

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. Februar 2004 (19.02.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/015161 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: C23C 14/02,
B32B 31/00, H01G 9/04, B26F 1/26, H01J 37/31, B29C
59/16

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): FRACTAL AG [DE/DE]; Löderburger Strasse
94, 39418 Stassfurt (DE). IST IONENSTRAHLTECH-
NOLOGIE GMBH [DE/DE]; Vor dem Gröpermtor 20,
06484 Quedlinburg (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002533

(22) Internationales Anmeldedatum:
23. Juli 2003 (23.07.2003)

(72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): DANZIGER, Manfred
[DE/DE]; Wallstrasse 23, 06484 Quedlinburg (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(74) Anwalt: HEYNER, Klaus; Mittelweg 1h, 01728 Ban-
newitz (DE).

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

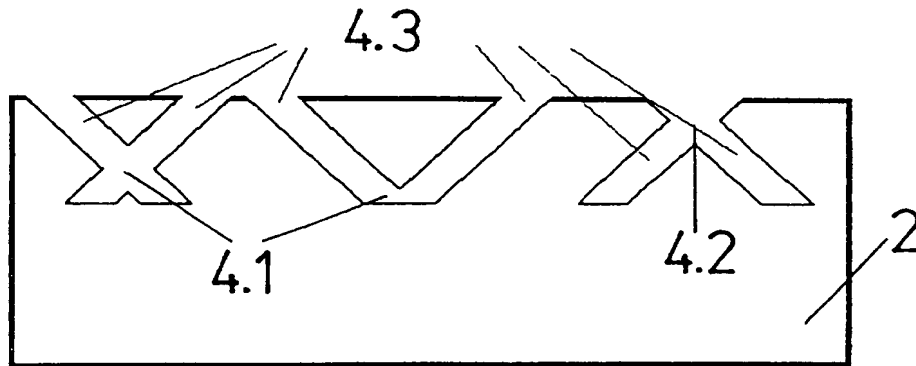
(30) Angaben zur Priorität:
102 34 614.3 24. Juli 2002 (24.07.2002) DE

(81) Bestimmungsstaaten (national): AU, CA, CN, ID, IL, IN,
JP, KR, PH, RU, SG, UA, US.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND ARRAY FOR PROCESSING CARRIER MATERIALS BY MEANS OF HEAVY ION RADIATION
AND SUBSEQUENT ETCHING

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND ANORDNUNG ZUR BEARBEITUNG VON TRÄGERMATERIAL DURCH
SCHWERIONENBESTRAHLUNG UND NACHFOLGENDEN ÄTZPROZESS



(57) Abstract: The invention relates to a method and an array for processing carrier materials by means of heavy ion radiation and subsequent etching, wherein the heavy ion radiation is carried out in such a way that a ray beam (1) of an energy-rich heavy ion radiation (1.1) incides on the surface (2) of a carrier material in at least two different angles. According to the invention, the fluence, the energy and the direction of incidence of the heavy ion rays (1.1) are selected in such a way that a maximum amount of intersecting or coinciding latent ion traces (3) and common numbers of incisions of the recesses (4) resulting from a chemical etching process following heavy ion radiation are obtained.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Anordnung zur Bearbeitung von Trägermaterial durch Schwerionenbestrahlung und nachfolgenden Ätzprozess, bei dem die Schwerionenbestrahlung so durchgeführt wird, dass der Einfall eines Strahlenbündels (1) energiereicher Schwerionenstrahlung (1.1) auf eine Trägeroberfläche (2) unter mindestens zwei unterschiedlichen Winkeln

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/015161 A1

BEST AVAILABLE COPY



(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

stattfindet. Erfindungsgemäss wird dabei die Fluenz, die Energie und die Einfallrichtung der Schwerionenstrahlen (1.1) so gewählt, dass eine maximale Anzahl von sich kreuzenden oder sich treffenden latenten Ionenspuren (3) und von gemeinsamen Schnittmengen der Ausnehmungen (4), die durch einen sich an die Schwerionenbestrahlung anschließenden chemischen Ätzprozess erhalten werden, entsteht.

Verfahren und Anordnung zur Bearbeitung von Trägermaterial durch Schwerionenbestrahlung und nachfolgenden Ätzprozess

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Anordnung zur Bearbeitung von dielektrischem Trägermaterial durch Schwerionenbestrahlung und nachfolgender Ätzung, wodurch dem Trägermaterial ein Oberflächen-Tiefen-Relief aufgeprägt werden kann, welches die Basis für haftfest auf dem Trägermaterial aufgebraachte passive oder aktive Schichten bildet.

Es ist bekannt, dass bei der Bestrahlung von Dielektrika (Polymere, Gläser etc.) mit energiereichen Schwerionen in diesen Stoffen entlang der Trajektorien der sich durch die Materie bewegendenden Ionen infolge der Energieabgabe durch Strahlungswechselwirkungen und nachfolgenden Sekundärreaktionen sog. "latente Spuren" mit einem Durchmesser im Nanometerbereich (10 bis einige 10 nm) entstehen. Die Länge dieser Spuren ist abhängig von der Eintrittsenergie der Ionen. Innerhalb dieser latenten Spuren ist das Material strahlungsmodifiziert und besitzt andere physikalische und chemische Eigenschaften als das umgebende Dielektrikum. Damit wird es möglich, durch geeignete nachfolgende Prozesse, meist durch chemisches Ätzen, das strahlenmodifizierte Material entlang der latenten Spuren zu entfernen und auf diesem Wege sog. "Ausnehmungen" zu erzeugen, wie z.B. Ätzgruben oder kanalartige Gebilde verschiedener Form. Ätzgruben entstehen, wenn die Einschussenergie nicht ausreicht, um das bestrahlte Material zu durchdringen - reicht dagegen die Energie hierzu aus, bilden sich die sog. "Mikrokanäle". Die Form der entstehenden Ausnehmungen ist neben den Bestrahlungsparametern, wie Ionenart, Eintrittsenergie, Bestrahlungswinkel, Targetmaterial (Zusammensetzung und Struktur des zu bestrahlenden Mediums) abhängig von der Ätzgeschwindigkeit des unveränderten Materials (Materialätzrate v_B) und der des modifizierten Materials in der latenten Ionenspur (Spurätzrate v_S). Diese beiden Parameter können durch die Wahl des Ätzmittels, dessen

Konzentration und Temperatur variiert werden. Da die Materialätzrate v_B neben den Bestrahlungsbedingungen zusätzlich auch durch eine Sensibilisierung (UV-Bestrahlung vor dem Ätzen, Sauerstoffeinfluss, Lösungsmittelleffekte) veränderbar ist, kann durch die Auswahl der Bestrahlungs-, Ätz- und ggf. Sensibilisierungsbedingungen eine zielgerichtete Materialbearbeitung durchgeführt werden.

Neben einer Nutzung in der Dosimetrie - hier dient die Zahl gebildeten Ätzgruben als Maß für die applizierte Strahlungsdosis - sind auf der Basis der beschriebenen Bestrahlungs- und nachfolgenden Ätzverfahren weitere technisch relevante Anwendungen bekannt:

Bei der Herstellung von Ionenspurmembranen für Filterzwecke werden u.a. Polymerfolien beispielsweise aus Polyestern oder Polyimiden mit Schwerionen so bestrahlt, dass die Ionen senkrecht auf die Folienoberfläche auftreffen. Die gewählte Einschussenergie muss ein vollständiges Durchdringen der Folie gewährleisten und die Energieübertragung pro Wegstrecke (dE/dx) sollte während der gesamten Ionentrajektorie möglichst konstant sein. Das nachfolgende Ätzverfahren wird so optimiert, dass die entstehenden Ausnehmungen die Form zylindrischer Kanäle definierten Durchmessers besitzen. Durch eine exakte Zylinderform wird erreicht, dass die Kanäle der Filtermembran beim Einsatz nicht verstopft werden und nach Rückspülung des Filterrückstandes die anfängliche Filtriergeschwindigkeit wieder erreicht wird. Die Einstellung einer definierten Porengröße ermöglicht eine zielgerichtete Herstellung von Ionenspurmembranen für unterschiedliche Einsatzgebiete (als Bakterienfilter, für Klärverfahren u.a.m.). In der EP 0583 605 A1 wird ein Verfahren zur Erzeugung derartiger Mikroporen durch Ätzen von Teilchenspuren beschrieben.

Die Schriften DE 2916006 A1 und EP 0583605 A1 zeigen die o.g. Kombination von Schwerionenbestrahlung, nachfolgender Ätzung und anschließender

Beschichtung der Trägersoberfläche. Hier werden folgende Verfahrensschritte zur Herstellung von haftfesten Metallschichten auf Nichtleitern ohne haftvermittelnden Zwischenschichten offengelegt: Bestrahlung verschiedener Dielektrika mit Schwerionen (Masse > 10 und Einschussenergie $> 0,1$ MeV/amu) insbesondere unter einer schrägen Einfallrichtung der Strahlung bis zum Erreichen einer nicht näher definierten Fluenz. Die nachfolgende Ätzung erfolgt bis zum Erreichen der gewünschten Größe der Löcher und führt damit zu einer definierten Oberflächenaufrauung. Ein "sog. Reißverschlusseffekt", von schräg in die Oberfläche reichenden herausgeätzten Vertiefungen führt zu einer Erhöhung der Haftfestigkeit einer nachfolgend durch konventionelle Verfahren aufgetragenen Metallschicht.

Umfangreiche eigene Untersuchungen ergaben, dass sich nach den Verfahren des Standes der Technik zwar unter Laborbedingungen Komposite aus Trägerfolie und Metallschicht mit gewünschter Haftfestigkeit (lt. DIN $\geq 0,8$ N/mm) herstellen lassen, diese aber Praxisanforderungen, insbesondere der Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeitseinflüssen, nicht Stand halten. Ursache dafür ist, dass der Feuchtigkeitseinfluss auf die Trägerfolie die vorhandenen „Verankerungen“ zwischen Trägerfolie und Metallschicht lockert (feuchtigkeitsinduzierte Gleiteffekte; „Schmierseifeneffekt“) und daher nur in trockenem Zustand eine für die Praxis erforderliche stabile Verbindung beider Komponenten gegeben ist.

Es ist weiterhin bekannt, Ionenspurmembranen für die gerichtete Stromleitung zu erzeugen. Die Bestrahlung der Polymerfolien erfolgt auf die gleiche Weise wie bei der Herstellung von Filtermembranen. Der nachfolgende Ätzprozess, der die Kanalbildung durch die Folie herbeiführt, wird hier jedoch so optimiert, dass Kanäle gleicher Form und Größe entstehen, wobei die Zylinderform wünschenswert ist. In weiteren Verfahrensschritten wird erreicht, dass nur die erzeugten Kanäle mit Metall gefüllt werden, die restliche Oberfläche aber nicht metallisiert wird. Auf diese Weise wird eine Membran erhalten, die nur senkrecht zur Oberfläche elektrisch leitend ist. Diese Lösungen sind in den Schriften DE 196 50 881 A1 und DE 33 37 049 A1 beschrieben.

Des Weiteren ist aus der DE 100 58 822 A1 ein Verfahren zur Bearbeitung von Trägerfolien durch Bestrahlung mit Schwerionen bekannt. Ziel dieser Erfindung ist es, die Haftfestigkeit zwischen den Trägerfolien und einer aufzubringenden Funktionsschicht zu verbessern.

Das zu bestrahlende Material wird während der Bestrahlung über ein Rollensystem mit einer Umlenkrolle, einer Entnahmerolle, einer Aufnahmerolle und zwei Fixierrollen geführt. Die Umlenkrolle ist an einer Schiene parallel in Richtung der Ausbreitung des Ionenstrahlbündels höhenverstellbar angeordnet. Mit dieser in der Höhe verstellbaren Umlenkrolle und den Fixierrollen können die Trägerfolien derart in zwei verschiedenen Winkeln zur Ausbreitungsrichtung der Ionenstrahlen ausgerichtet werden, dass durch die Bestrahlung mit Schwerionen ein Oberflächen-Tiefen-Relief aus latenten Ionenspuren entsteht. In diese zu Ausnehmungen aufgeätzten Ionenspuren greifen Materialteile der aufzubringenden Funktionsschicht ein und verankern damit die Funktionsschicht in der Trägerfolie.

Das hier beschriebene Verfahren stellt die ersten unvollkommenen Anfänge einer Bestrahlung von Trägerfolien dar, bei der die Schwerionen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auftreffen können.

Aus US 4,416,724 ist ein Verfahren bekannt, mit dem die Oberfläche eines Nichtleiters durch eine Bestrahlung mit Schwerionen vergrößert werden soll, wobei die dabei entstehenden latenten Ionenspuren durch einen sich an die Bestrahlung anschließenden Ätzzvorgang aufgeweitet werden. Die Bestrahlung erfolgt im Vakuum wobei der kollimierte Schwerionenstrahl partiell von einem rotierenden Gitter und einer magnetischen Ablenkeinrichtung in seiner Strahlrichtung beeinflusst wird. Dadurch kann die Oberfläche des Nichtleiters bis zum 1000-fachen Wert seiner ursprünglichen Oberfläche vergrößert kann. Als Parameter zur Erzeugung einer geeigneten Oberflächenporosität sind die Bestrahlungsenergie, die Bestrahlungsdichte und das Bestrahlungsmedium genannt.

Die in den benannten Lösungen beschriebenen Verfahrensschritte sind hinsichtlich der Anwendungsbreite ihrer Ergebnisse auf die jeweiligen eng begrenzten Bearbeitungsziele beschränkt. Es ist mit den Merkmalen des Standes der Technik nicht möglich, auf dem Trägermaterial eine geeignete Struktur (Oberflächen-Tiefen-Relief) zu erzeugen die eine zuverlässige und stabile Grundlage für die Aufbringung und ausreichend starke und dauerhafte Haftung von Nutzschichten darstellt.. Mit den bekannten Mitteln kann lediglich eine Anhaftung solcher Schichten auf dem Träger erreicht werden, die keiner besonderen Belastung unterliegen. Werden jedoch die haftenden Schichten z.B. mechanischen oder Feuchtigkeitseinflüssen ausgesetzt, ist eine strapazierbare Verbindung von Träger und Schicht nicht mehr gegeben. Aus diesem Grunde werden allgemein Haftvermittler verwendet, die das Haftvermögen der aufgetragenen Schichten verbessern, jedoch z.B. bei Feuchtigkeitseinflüssen ebenfalls versagen können. Es ist auch möglich, mechanische oder thermische Oberflächenbehandlungen der Trägerfolien durchzuführen, jedoch vergrößert dies den Fertigungsaufwand erheblich.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Lösung zu entwickeln, mit der Trägerfolien so bearbeitet werden können, dass es möglich ist, auf ihnen passive oder aktive Schichten äußerst haftfest aufzubringen. Mit der zu entwickelnden Technologie soll die Anwendung von Haftvermittlern und die mechanische oder thermische Oberflächenbehandlung bei bzw. vor der Beschichtung der Trägerfolien ersetzt werden.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch ein Verfahren und eine Anordnung gelöst, wie sie mit ihren prinzipiellen Merkmalen in den Patentansprüchen 1 und 9 angegeben sind. Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweils zugehörigen Unteransprüchen gekennzeichnet.

Beim erfindungsgemäßen Verfahren werden grundsätzlich: Bestrahlung und Ätzung so durchgeführt, dass Ausnehmungen (Poren und dgl.) gebildet

werden, die eine Trägerfolie nicht durchstoßen. Auf diese Weise kann eine Oberflächenstruktur erzielt werden, die eine nachfolgende haftfeste Beschichtung ermöglicht.

Erfindungsgemäß müssen dabei die Schwerionen unter mindestens zwei unterschiedlichen Einfallswinkeln in das Trägermaterial eindringen. Die Reichweite der Ionen, d.h. deren Eindringtiefe, wird dabei entsprechend den Anforderungen durch Variation ihrer Einschussenergie verändert. Durch die verschiedenen Einstrahlungsrichtungen sowie hinreichend langes Ätzen wird erreicht, dass sich unterschiedlichste Oberflächen-Tiefen-Reliefs erzeugen lassen. Der Begriff "Oberflächen-Tiefen-Relief" bedeutet, dass die Strukturierung von der Oberfläche bis in eine bestimmte Tiefe des Materials dazu führt, dass im strukturierten Bereich die Unterschiede zwischen Oberfläche und Volumen bis zu einem gewissen Grad verwischt werden. Das entstandene Relief erinnert an eine fraktale Struktur, die durch die fraktale Dimension D mit $2 < D < 3$ gekennzeichnet ist, wobei D von der Oberfläche her anwächst und im Volumen bei Erreichen des nicht mehr durch die Strukturierung beeinflussten Volumens den Wert 3 erreicht.

Von besonderem Vorteil bei derartigen zerklüfteten Strukturen ist die Bildung "hintergreifbarer" Ausnehmungen (z.B. kegelstumpffartige Formen/Kavernen). Die entstandenen „Hintergreifungen“, verursacht durch die oben beschriebene fraktale Struktur, bilden, soweit sie sich vollständig durch die zweite Komponente des Komposits auffüllen lassen die Grundlage für die dauerhafte hohe Haftfestigkeit der Deckschicht.

Dabei wird die angestrebte Haftfestigkeit nicht nur durch mechanische Wirkung, sondern auch durch auftretende oberflächenphysikalische Kräfte, z.B. Polarisationen, Dipol-Dipol-Effekte, van-der-Waals-Kräfte u.a., bewirkt. Letztere werden zwar durch Feuchtigkeitseinfluss stark erniedrigt, aber die mechanisch bedingte Haftwirkung bleibt unverändert.

Eine Steigerung der dauerhaften Haftfestigkeit im o.g. Sinne kann durch Erzeugung gemeinsamer Schnittmengen von Ausnehmungen erreicht werden. Unter einer gemeinsamen Schnittmenge ist das Zusammentreffen oder das Kreuzen von zwei Ausnehmungen zu verstehen.

Erfindungsgemäß ist als Voraussetzung für diese Verfahrensweise auch hier eine Bestrahlung des Trägermaterials unter mindestens zwei unterschiedlichen Einfallswinkeln vorzusehen.

Die Fluenz und Einfallsrichtung der Schwerionen werden so gewählt, dass eine maximale Anzahl von sich überschneidenden oder sich treffenden Volumeneinheiten entsteht, in deren Inneren sich die erzeugten latenten Ionenspuren befinden. Die Ausnehmungen, die sich durch einen der Bestrahlung nachfolgenden Ätzprozess herausbilden, weisen sogenannte gemeinsame Schnittmengen auf.

Um ein Maximum an dauerhafter Haftfestigkeit durch gemeinsame Schnittmengen zu erreichen, ist eine spezielle Dimensionierung der Bestrahlungsparameter erforderlich. Folgende fünf Parameter müssen berücksichtigt werden:

- a) applizierte Ionenfluenz,
- b) Einfallswinkel der Schwerionen auf die Trägeroberfläche,
- c) Winkel der verschiedenen Einfallsrichtungen der Ionen gegeneinander,
- d) Reichweite der Strahlung im Festkörper und
- e) Eintrittsenergie bzw. Energieabgabe pro Längeneinheit entlang der Trajektorien der in den Festkörper eindringenden, energiereichen Schwerionen.

Besonders hohe Haftfestigkeitswerte werden erreicht, wenn die Bestrahlungs- und Ätzparameter so gewählt werden, dass sich nach dem Ätzprozess ein

Oberflächen-Tiefen-Relief herausgebildet hat, welches in oberflächennahen Bereich die bereits beschriebenen fraktalen Oberflächenstruktur besitzt und in von der Oberfläche entfernten Bereichen, Ausnehmungen mit häufig auftretenden gemeinsamen Schnittmengen aufweist.

Für industrielle Anwendungen der Ionenspurtechnologie werden die benötigten energiereichen Schwerionen durch Beschleuniger erzeugt. Beschleuniger sind in der Regel so konzipiert, dass energiereiche Schwerionen mit diskreten Energiewerten verfügbar sind. Es ist daher im Normalfall notwendig, eine zusätzliche Vorrichtung zu verwenden, die sich im Strahlführungskanal der Bestrahlungsanlage, d.h. vor dem zu bestrahlenden Trägermaterial, befindet. Mit Hilfe dieser Vorrichtung ist es möglich, den Strahl auf einen festgelegten Energiewert einzustellen, der den Ioneneintrittsenergiewert für den zu bestrahlenden Festkörper (z.B. eine Polymerfolie) darstellt. Eine solche Vorrichtung wird nachfolgend Abbremsmodul bezeichnet und kann z. B. aus dünnen Metallfolien bestehen. Dieses Abbremsmodul ist erfindungsgemäß in Richtung der Ausbreitung der Schwerionenstrahlen vor dem Rollensystem und damit auch vor dem zu bestrahlenden Trägermaterial angeordnet. Die Einstellung der Eintrittsenergie, die kleiner sein muss als der Energiewert der Ionen nach dem Verlassen des Beschleunigers, erfolgt dadurch, dass die energiereichen Schwerionen während des Durchdringens dünner Metallfolien Energie verlieren. Somit kann durch die Wahl der Dicke der Metallfolien eine diskrete, festgelegte Eintrittsenergie erzeugt werden, welche dem erwünschten Energiewert für den zu bestrahlenden Festkörper entspricht.

Bezüglich der Bestrahlungstechnologie ergeben sich zwei Varianten zur Realisierung des o.g. Verfahrens:

Einmal wird durch geeignete Kollimierung der einfallenden Strahlung aus mindestens zwei Richtungen der Einfallswinkel bezüglich der Oberflächen und der Strahlung gegeneinander konstant gehalten, so dass nur Fluenz und Reichweite der Schwerionenstrahlung aufeinander abgestimmt werden müssen

um ein Maximum an Schnittmengen in einem bestimmten Gebiet des Trägermaterials zu erzeugen.

Zum anderen wird keine Kollimierung der aus mindestens zwei Richtungen einfallenden Schwerionenstrahlung vorgesehen, so dass jetzt auf Grund der nun möglichen Variation der Einfalls- und Schnittwinkel die Bildung und Verteilung der Schnittmengen im Trägermaterial weitgehend stochastisch erfolgt. Hier müssen dann alle Parameter in die Optimierung einbezogen werden, was eine Lösung über Computersimulation des Prozesses bedingt, um die Bedingungen für einen Maximalwert von Schnittmengen zu ermitteln.

Die Ätzbedingungen des bestrahlten Materials müssen so gewählt werden, dass eine optimale Form der Ausnehmungen gebildet wird. Dabei ist ein Aspektverhältnis A, d.h. das Verhältnis von Porenlänge zu Porendurchmesser, von ≥ 3 anzustreben.

Durch die erfindungsgemäße Kombination von Bestrahlungs- und Ätzbedingungen gelingt es bei dieser Verfahrensweise, nicht nur „Hintergreifungen“ sondern auch durch bei den Schnittmengen vorhandenen verbundene Poren, sog. „Verschnürungen“, herzustellen, die eine dauerhafte, hohe Haftfestigkeit der darin verankerten Deckschicht des Komposits garantieren.

Die vorliegende Erfindung ermöglicht die Herstellung von Kompositen aus Trägermaterial und Deckschichten ohne irgend einen Haftvermittler. Die Komposite zeichnen sich dabei durch dauerhaft hohe Haftfestigkeitswerte, insbesondere unter Bedingungen ihres Kontaktes mit Wasser bzw. mit wässrigen Lösungen oder mit einer Atmosphäre hohen Feuchtigkeitsgehalts, aus.

Erfindungsgemäß kann weiterhin durch eine Überätzung die Haftfestigkeit aufgebrachter Schichten weiter gesteigert werden.

Eine bevorzugte Ausführungsform für eine Bestrahlungsanordnung des neuen Verfahrens zeichnet sich dadurch aus, dass eine Ionenspurfolie als Trägerfolie über ein Führungssystem transportiert und mit einem verstellbaren Neigungswinkel $\pm\alpha$ oder $+\alpha_1 / -\alpha_2$ zu den auftreffenden Ionenstrahlen angeordnet wird und dabei die mit diesem Neigungswinkel geführten Flanken der Folienbahn symmetrisch oder unsymmetrisch zur Längsrichtung der Ionenstrahlen verlaufen.

Das symmetrisch oder unsymmetrisch aufgebaute Führungssystem kann dabei als Rollensystem mit vorpositioniertem Abbremsmodul zur Einstellung der Ioneneintrittsenergie ausgeführt sein und aus einer Entnahmerolle für die Trägerfolie am Anfang des Bearbeitungsweges der Trägerfolie, einer Aufnahmerolle für die bestrahlte Trägerfolie am Ende des Bearbeitungsweges, 2 jeweils zur Mitte eingerückte und oberhalb der Ebene von Entnahme / und Aufnahmerolle angeordnete Fixierrollen und einer oberhalb der Ebene der beiden Fixierrollen und vorzugsweise mittig zwischen den Fixierrollen positionierten Umlenkrollen bestehen. Zur Einstellung des Einfallswinkels $\pm\alpha$ oder $+\alpha_1 / -\alpha_2$ der Ionenstrahlen auf die Trägerfolie ist die Umlenkrolle entlang eines Bereichs der Symmetrieachse oder parallel zur Symmetrieachse des Rollensystems höhenverstellbar angeordnet. Für unterschiedliche Einfallswinkel $+\alpha_1 / -\alpha_2$ lässt sich der Abbremsmodul so nutzen, dass für jeden speziellen Einfallswinkel (z.B. für $+\alpha_1$ oder für $-\alpha_2$) ein entsprechender Eintrittsenergiewert der eindringenden Ionen eingestellt werden kann, in dem der Modul aus Teilkomponenten mit unterschiedlich dicken Abbremsfolien aufgebaut ist. In einer speziellen Ausführungsform weist der Abbremsmodul über seine Längserstreckung unterschiedlich dicke Folien auf, um für jeden Einfallswinkel $+\alpha_1$ oder $-\alpha_2$ einen gewünschten Eintrittswert der in das Trägermaterial (2) eindringenden Ionen sicherzustellen.

Die Höhenverstellung der Umlenkrolle erfolgt beispielsweise durch ihre Führung auf der Schiene.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Patentansprüche verwiesen.

Einzelheiten, Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich auch aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen. In der dazugehörigen Zeichnung zeigen:

Fig.1 eine schematische Darstellung möglicher gemeinsamer Schnittmengen von Ausnehmungen in Ionenspurfolien,

Fig.2 eine Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Kollimierung der energiereichen Schwerionenstrahlen,

Fig.3 eine Darstellung des Verlaufs der Haftkraft der Kompositkomponenten Ionenspurfolie und Kupfer in Abhängigkeit vom Porendurchmesser der Ionenspurfolie,

Fig.4 den schematischen Aufbau einer Anordnung mit einem Abbremsmodul zur Ausführung des Bestrahlungsvorgangs einer Folie,

Fig.5 eine Elektronenmikroskopaufnahme eines typischen Profils einer stark zerklüfteten Oberfläche mit einem ausgeprägten Tiefenrelief einer Polyester-Ionenspurfolie in einer Draufsicht.

Fig.1 veranschaulicht die Entstehung gemeinsamer Schnittmengen von Ausnehmungen 4 in Ionenspurfolien 2.

Dargestellt sind in Fig. 1.1, einer Schnittdarstellung durch die Trägerfolie 2, zwei Trefferpaare 4.1, die wesentlich zur Haftfestigkeit beitragen und ein Trefferpaar, das wenig zur Haftfestigkeit beiträgt.

Fig.1.2 zeigt ergänzend die räumliche Darstellung einer Schnittmenge 4.1 mit Ausnehmungen (Poren) 4.3.

Fig.2 zeigt die schematische Darstellung einer vorteilhaften Variante für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Kollimierung der energiereichen Schwerionenstrahlen 1 zum Erhalt einer möglichst großen Anzahl gemeinsamer Schnittmengen 4 von Ausnehmungen in Ionenspurfolien 2. Unter einer gemeinsamen Schnittmenge 4 ist das Treffen oder das Kreuzen von zwei Ausnehmungen zu verstehen.

Fig. 2.1 enthält dabei die schematische Darstellung einer Bestrahlungsmaske 5. Die auf den Rollen 6 und 7 ab- bzw. aufgewickelte Folie 2 wird zweimal unter der Maske 5 hindurchgeführt; die Ionen 1.2. werden je Foliendurchlauf unter dem Einschusswinkel $\pm\alpha$ gestrahlt.

Fig. 2.2 zeigt, bezogen auf eine Schnittebene die schematische Darstellung der Ionentrajektorien 1.1 mit Durchdringen der Maske 5 und Eindringen in den Festkörper 2. Im Ergebnis dieses Verfahrensschrittes entstehen die latenten Ionenspuren 3 vor dem sich anschließenden Ätzprozess. Gegenstand von Fig. 2.3 ist die für eine Schnittebene erfolgte schematische Darstellung der gemeinsamen Schnittmengenbildung.

Gezeigt wird hier die gemeinsame Schnittmenge 4 des Ausnehmungen (Poren) nach dem Ätzprozess.

Fig. 3 veranschaulicht die graphische Auswertung eines Haftfestigkeitstest von Kompositen aus Ionenspurfolien 2 (Polyimid) und Kupfer in Abhängigkeit von

Porendurchmesser der Ionenspurfolie. Der Abzugstest wurde unmittelbar nach der Entnahme der Proben aus einer wässrigen Lösung durchgeführt.

Um den Einfluss gemeinsamer Schnittmengen auf die Haftfestigkeit eines Komposits, bestehend aus zwei Bestandteilen, zu verdeutlichen, kann die relative Porosität, das Verhältnis von geätzter zu nicht geätzter Oberfläche, als Maß für die Effektivität des Prozesses zur Bildung des Oberflächen-Tiefen-Reliefs dienen. Bei konstanter Ionenfluenz gilt: Je größer die Porosität ist, um so größer ist die Anzahl gemeinsamer Schnittmengen und damit die Haftfestigkeit. Da mit anwachsender Porosität auch der Durchmesser der Ausnehmungen wächst, wächst ebenfalls die Wahrscheinlichkeit für die Ausbildung gemeinsamer Schnittmengen. Bei sehr großer Porosität erzeugt durch starkes Überätzen, ist bei Erhalt bestimmter Porositätswerte wiederum eine Abnahme der Haftfestigkeit zu verzeichnen, weil durch den Überätzungseffekt auch Ausnehmungen vernichtet werden. Gleichfalls führt ein zunehmender Porendurchmesser zu einer Verkleinerung des Aspektverhältnisses und einer Verringerung des Festkörperanteils im Volumensegment des Trägerfolienmaterials, was ebenfalls eine Verschlechterung des Haftfestigkeitswertes bedeutet. Aus diesen gegenläufigen Effekten ergibt sich für eine konstante Ionenfluenz ein Maximum bei der Haftfestigkeitskurve in Abhängigkeit von der Porosität, so wie es in Fig. 2 dargestellt ist.

Fig. 4 zeigt die schematische Darstellung einer Anordnung mit einem Abbremsmodul zur Ausführung des Bestrahlungsvorganges einer Polyesterfolie, die als Trägerfolie einer flexiblen Leiterplatte eingesetzt werden soll.

Hierbei erfolgt in einem ersten Anwendungsbeispiel die Bearbeitung einer Ionenspurfolie 2 als Trägerfolie einer haftesten Schicht aus Kupfer zum Einsatz als Ausgangsmaterial für flexible Leiterplatten.

In Fig. 4 wird eine Folie 2 der Dicke 50 μm , bestehend aus Polyethylenterephthalat (PETP ein sog. Polyester), einer Bestrahlung mit einem $^{84}\text{Kr}^+$ (Krypton)-Ionenstrahlbündel 1 unterzogen. Dazu wird das in Rollenform (Breite 50 cm) vorliegende Ausgangsmaterial über ein Rollensystem aus 5 Rollen durch das Ionenstrahlbündel 1 geführt. Vor dem Rollensystem 6, 7, 8, 9, 10, 12 ist in Richtung der Ausbreitung der Schwerionenstrahlen 1.1 ein Abbremsmodul 13, das in Richtung der Ausbreitung der Schwerionenstrahlen 1.1 orthogonal vor dem Rollensystem 6, 7, 8, 9, 10, 12 angeordnet ist, vorgesehen, welches vom Strahlenbündel 1 durchdrungen wird und die Eintrittsenergie der Ionen in das Folienmaterial festlegt. Das hier symmetrisch aufgebaute Rollensystem enthält eine Entnahmerolle 6 mit der Polyesterfolie 2 und einer Aufnahmerolle 7 für die Polyesterfolie 2 nach erfolgter Bestrahlung. Dazwischen befinden sich eine erste Fixierrolle 8, eine Umlenkrolle 9 sowie eine zweite Fixierrolle 10. Das Ionenstrahlbündel 1 überstreicht den Bereich zwischen den beiden Fixierrollen 8 und 10, wobei durch eine Blende 11 ein beliebiger Teilbereich des Ionenstrahlbündels 1 ausgeblendet werden kann. Die Umlenkrolle 9 ist auf einer Schiene 12 parallel zur Richtung des Ionenstrahlbündels 1 verschiebbar angeordnet und ermöglicht es dadurch, den Einfallswinkel α der Ionen relativ zur Oberflächennormalen zwischen -70° und $+70^\circ$ zu variieren.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel ist der Einfallswinkel von 45° eingestellt. Der Teilbereich, indem sich die Umlenkrolle 9 befindet wird dazu aus dem Ionenstrahlbündel 1 ausgeblendet. Dadurch kommen nur 2 Strahlenbündelteile, denen die Einfallswinkel -45° und $+45^\circ$ zugeordnet werden können, zur Wirkung. Diese erzeugen unter den genannten Winkeln 2 Scharen latenter Ionenspuren 3. Die totale Bestrahlungsdichte (Fluenz) beträgt dabei $5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$.

Die Eintrittsenergie der Ionen beträgt 1,2 MeV/amu, was zu einer mittleren Reichweite von 20 μm führt.

Die bestrahlten Folien 2 werden sodann bei einer Temperatur von 80°C einer 10- bis 30-minütigen Ätzung mit 3 molarer NaOH-Lösung unterzogen. Daraus resultiert eine Aufätzung der latenten Ionenspuren 3 zu zylindrischen Sacklochausnehmungen mit einem Durchmesser von 2 µm und einer Länge von ca. 18-19 µm. Diese Länge ist etwas geringer als die Eindringtiefe der Ionen, da am Ende der Ionenspur der Energieübertrag auf die Polyesterfolie 11 so gering wird, dass die Spur nicht mehr ätzbar ist. Die Länge dieses nicht ätzbaren Abschnitts beträgt ca. 5-10% der Gesamtlänge der Ionenspur.

Zur Erzeugung der funktionellen Schicht wird zunächst eine Startschicht der Dicke 0,2 bis 0,4 µm, bestehend aus Kupfer, durch Sputtern (Vakuumbeschichten) aufgebracht. Die eigentliche Kupferschicht der Dicke 5 bis 140 µm wird danach galvanisch abgeschieden. Die so hergestellte kupferbeschichtete Polyesterfolie zeichnet sich durch eine hohe Haftfestigkeit der Deckschicht ($> 2 \text{ N/cm}$), erzielt durch deren mechanische Verankerung in den Poren des Grundmaterials, aus. Sie ist zum Einsatz als flexible Leiterplatte mit hoher mechanischer Wechselbeanspruchung gut geeignet.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel erfolgt die Bearbeitung eine Ionenspurfolie mit hoher spezifischer Oberfläche als Träger einer Aluminiumbeschichtung

Eine Polyesterfolie 2 bestehend aus Polyethylenterephthalat (PETP), der Dicke 23 µm wird einer Bestrahlung mit $^{40}\text{Ar}^+$ -Ionen 1 unterzogen. Dazu wird das in Rollenform (Breite 50 cm) vorliegende Ausgangsmaterial über das im ersten Anwendungsbeispiel beschriebene Rollensystem 7 – 10 geführt.

Im vorliegenden Fall wird der Einfallswinkel α auf $\pm 30^\circ$ eingestellt, d.h., die Bestrahlung erfolgt nacheinander unter den Winkeln $+30^\circ$ und -30° relativ zur Oberflächennormale der Folie 2, wobei die totale Bestrahlungsdichte $5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ beträgt. Die Eintrittsenergie der Ionen wird mittels des Abbremsmoduls auf

0,11 MeV/amu eingestellt, woraus latente Ionenspuren 3 resultieren, deren effektive (ätzbare) Länge ca. 7 μm beträgt.

Die Oberfläche der bestrahlten Folie 2 wird sodann bei einer Temperatur von 90°C einer 6-bis 8-minütigen Ätzung mit 5 molarer NaOH-Lösung unterzogen, wodurch die latenten Ionenspuren 3 zu kegelstumpfförmigen Kavernen bzw. Sacklöchern mit einer Tiefe von ca. 7 μm , resultierend aus der o.g. effektiven Länge, aufgeätzt werden. Der Durchmesser der (aufgrund des steilen Einschusswinkels) nahezu kreisförmigen Ausnehmungsöffnungen an der Oberfläche beträgt dabei 1,9 - 2,1 μm , was einer Fläche von ca. $3 \mu\text{m}^2 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$ entspricht. Die durch Ausnehmungen bedeckte Gesamtfläche, die durch das Produkt aus Ausnehmungsfläche und totaler Bestrahlungsdichte gegeben ist, beträgt damit ca. 1,5 cm^2 je Flächeneinheit von 1 cm^2 , entspricht folglich einem theoretischen Flächenanteil von ca. 150%. Der Ätzprozess wird hier also solange fortgesetzt, bis die durch Ausnehmungen bedeckte Fläche die zur Verfügung stehende Fläche rechnerisch um etwa 50 % übersteigt. Dieser Prozess wird als Überätzung bezeichnet und ist durch eine starke gegenseitige Überlappung/Überschneidung der Ausnehmungen gekennzeichnet. Im Ergebnis dieser Formierung entsteht eine Folie mit einer stark zerklüfteten, Oberfläche und einem ausgeprägten Tiefenrelief. Ein typisches Beispiel zeigt Fig. 5. Die Folie 2 weist eine extrem hohe spezifische Oberfläche auf. Ihre mechanische Stabilität bleibt erhalten, da die Dicke des formierten Bereichs nur etwa ein Drittel ihrer Gesamtdicke ausmacht.

Die so formierte Folie wird bei einem Arbeitsdruck von $\leq 1 \cdot 10^{-1}$ mbar mit Aluminium bedampft. Die zum Erreichen einer bestimmten Schichtdicke erforderliche Dauer der Bedampfung muss experimentell ermittelt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Al-beschichteten Folien wird die so abgeschiedene Al-Schicht nicht nur adhäsiv an das Substrat gebunden, sondern zusätzlich mechanisch in den Ausnehmungen desselben verankert.

Viele praktische Anwendungen solcher Al-beschichteter Polymerfolien erfordern eine nachfolgende Oxidation der Oberfläche, wobei mechanische Spannungen im Schichtsystem $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_x\text{O}_y\text{-Al-Polymer}$ entstehen. (Al_xO_y bezeichnet dabei eine nichtstöchiometrische Übergangsschicht zwischen dem Metall und dem Oxid, die durch eine kontinuierliche Änderung des Sauerstoffgehalts gekennzeichnet ist.) Das System Oxid-Übergangsschicht-Metall ist sehr haftfest, jedoch werden die mechanischen Spannungen auf den Verbund Metall-Polymer übertragen. Das führt bei herkömmlichen beschichteten Folien zu einem Abblättern der Schicht vom Substrat (Polymer). Aufgrund der hier realisierten mechanischen Verankerung wird die Haftfestigkeit der Schicht so stark gesteigert, dass ein Abblättern infolge der Oberflächenoxidation vermieden wird. Gleichmaßen wird die Biegefestigkeit des Produkts verbessert, so dass es zu einer Rolle mit sehr geringem inneren Krümmungsradius gewickelt werden kann.

Derartige Al-bedampfte und an der Oberfläche oxidierte Folien sind als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Elektrolytkondensatoren einsetzbar.

LISTE DER BEZUGSZEICHEN

- 1 Strahlenbündel von Schwerionen
- 1.1 Ionenstrahlen
- 2 Trägeroberfläche, Trägermaterial, Folie
- 3 latente Ionenspuren
- 4 gemeinsame Schnittmengen von Ausnehmungen
- 4.1 Trefferpaare, die wesentlich zur Haftfestigkeit beitragen
- 4.2 Trefferpaare, die wenig zur Haftfestigkeit beitragen
- 4.3 Ausnehmungen (Poren)
- 5 Bestrahlungsmaske
- 6 Entnahmerolle
- 7 Aufnahmerolle
- 8 erste Fixierrolle
- 9 Umlenkrolle
- 10 zweite Fixierrolle
- 11 Blende
- 12 Schiene
- 13 Abbremsmodul

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Bearbeitung von Trägermaterial durch Schwerionenbestrahlung und nachfolgenden Ätzprozess, bei dem die Schwerionenbestrahlung so durchgeführt wird, dass der Einfall eines Strahlenbündels (1) aus energiereichen Schwerionenstrahlen (1.1) auf eine Trägeroberfläche (2) unter mindestens zwei unterschiedlichen Winkeln stattfindet, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Fluenz und Einfallsrichtung der Schwerionenstrahlen (1.1) so gewählt werden, dass eine maximale Anzahl von sich kreuzenden oder sich treffenden latenten Ionenspuren (3) und von gemeinsamen Schnittmengen der Ausnehmungen (4), die durch einen sich an die Schwerionenbestrahlung anschließenden chemischen Ätzprozess erhalten werden, entsteht.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Dimensionierung der Bestrahlung mittels der folgenden fünf Parameter erfolgt:
 - a) applizierte Ionenfluenz,
 - b) Einfallswinkel der Schwerionenstrahlen (1.1) auf die Trägeroberfläche (2),
 - c) Winkel der verschiedenen Einfallsrichtungen der Schwerionenstrahlen gegeneinander,
 - d) Reichweite der Strahlung im Festkörper und

- e) Eintrittsenergie bzw. Energieabgabe pro Längeneinheit entlang der Trajektorien der in den Festkörper eindringenden, energiereichen Schwerionen.
-
- 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Kombination von Kollimierung und Ausblendung von Schwerionenstrahlen (1.1) zur Erzeugung einer möglichst großen Anzahl gemeinsamer Schnittmengen von Ausnehmungen (4) in Trägerspurfolien (2) durch mehrmaliges Hindurchführen der Trägerspurfolie (2) unter einer Bestrahlungsmaske (5) erfolgt, wobei die Ionenstrahlen (1.1) je Foliendurchlauf unter einem Einschusswinkel $\pm\alpha$ oder $+\alpha_1/-\alpha_2$ auf die Trägerspurfolie (2) auftreffen.
 - 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schwerionen (1.1) die Trägerspurfolien nicht durchdringen, d.h.
 - a) ihre Ioneneinschussenergie unterhalb des Bragg-Peak-Energiewertes liegt und ihre Reichweite im Festkörpermateriale gering ist oder
 - b) ihre Ioneneinschussenergie so gewählt wird, dass sie oberhalb des Bragg-Peak-Energiewertes für die Strahlenwechselwirkung liegt und sich somit der Bereich der größten Energieübertragung innerhalb der Wegstrecke des Ions durch den Festkörper befindet, wobei für diesen Fall die Reichweiten innerhalb des Festkörpermateriale größer bis wesentlich größer sind.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schwerionenbestrahlung so durchgeführt wird, dass durch optimale Einstellung des dE/dx -Wertes die Voraussetzungen für die Ätzung hintergreifbarer Ausnehmungen (4) , mit möglichst kegelstumpffartigen Formen/Kavernen , erfüllt werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ätzbedingungen so gewählt werden, dass neben anderen geometrischen Formen vorwiegend keulenförmige oder kegelstumpffartige Ätzspuren und dgl. gebildet werden und je nach Bestrahlungsbedingungen ein Oberflächen-Tiefen-Relief entsteht, dass zu einer festen, dauerhaften Verankerung der aufzubringenden Deckschicht mittels Hintergreifungen oder Verschnürungen führt.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Aspektverhältnis A der geätzten Spuren, d.h. das Verhältnis der Porenlänge zu Porendurchmesser einen Wert von $A \geq 3$ besitzt, um bei den gebildeten Hintergreifungen und/oder Verschnürungen die feste und dauerhafte Verankerung der Deckschicht auf dem Trägermaterial (2) optimal zu ermöglichen.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Oberflächen-Tiefen-Relief der Trägerfolie (2) infolge der gewählten Bearbeitungsschritte bei Bestrahlung und Ätzung eine fraktale Struktur mit der fraktalen Dimension D von $2 < D < 3$ besitzt.
9. Anordnung zur Bearbeitung von Trägermaterial durch Schwerionenbestrahlung und nachfolgenden Ätzprozess, bei dem die Schwerionenbestrahlung so durchgeführt wird, dass der Einfall eines Strahlenbündels (1) aus energiereichen Schwerionenstrahlen (1.1) auf

eine Trägeroberfläche (2) unter mindestens zwei unterschiedlichen Winkeln stattfindet, **dadurch gekennzeichnet, dass** mittels eines Abbremsmoduls (13) und der Einstellung seiner Dicke das gerichtete Strahlenbündel mit einer definierten Eintrittsenergie in das Trägermaterial eindringt und damit eine definierte Reichweite und Energieabgabe der eindringenden Schwerionen erzielt wird, wobei sich in Abhängigkeit von der applizierten Ionenfluenz die stochastische Bildung und Verteilung einer maximalen Anzahl von sich kreuzenden oder sich treffenden latenten Ionenspuren bzw. von gemeinsamen Schnittmengen der Ausnehmungen, die nach dem Ätzprozess erhalten werden, einstellt oder eingestellt werden kann.

10. Anordnung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** das symmetrisch oder nicht symmetrisch aufgebaute Führungssystem als Rollensystem ausgeführt ist und folgenden Aufbau aufweist:
- a) ein Abbremsmodul (13), das in Richtung der Ausbreitung der Schwerionenstrahlen (1.1) vor dem Rollensystem (6, 7, 8, 9, 10, 12) sowie dem Trägermaterial angeordnet ist,
 - b) eine Entnahmerolle (6) für die noch unbestrahlte Trägerfolie (2) am Anfang des Bearbeitungsweges der Trägerfolie (2),
 - c) einer Aufnahmerolle (7) für die bestrahlte Trägerfolie (2) am Ende des Bearbeitungsweges der Trägerfolie (2),
 - d) einer Umlenkrolle (9), die entlang einer parallel zu dem Strahlenbündel von Schwerionen (1) angeordneten Schiene (12) höhenverstellbar angeordnet ist und

- e) zwei Fixierrollen (8, 9), die jeweils zwischen der Entnahmerolle (6) und der Umlenkrolle (9) bzw. zwischen der Umlenkrolle (9) und der Aufnahmerolle (7) angeordnet sind, wobei die Fixierrollen (8, 9) und die Entnahmerolle (6) sowie die Aufnahmerolle (7) nicht in einer gemeinsamen Ebene liegen.
11. Anordnung nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Abbremsmodul (13) aus Folien besteht und der Abbremsmodul (13) über seine Längserstreckung unterschiedlich dicke Folien aufweist, um für jeden Einfallswinkel $+\alpha_1$ oder $-\alpha_2$ einen gewünschten Eintrittswert der in das Trägermaterial (2) eindringenden Ionen sicherzustellen.

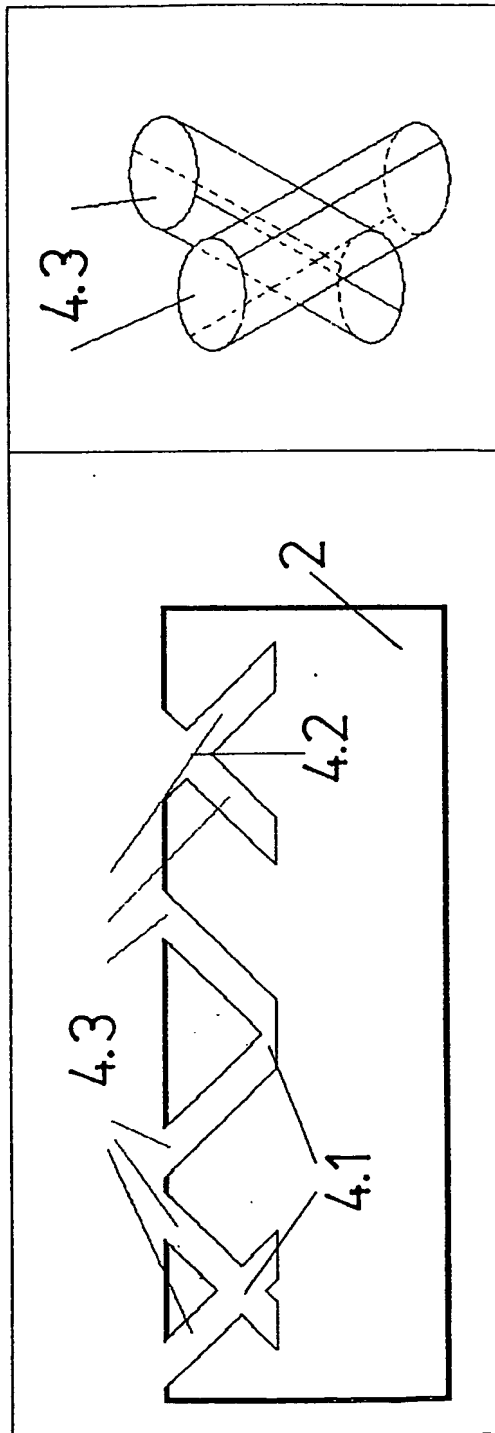


FIG. 1.2

FIG. 1.1

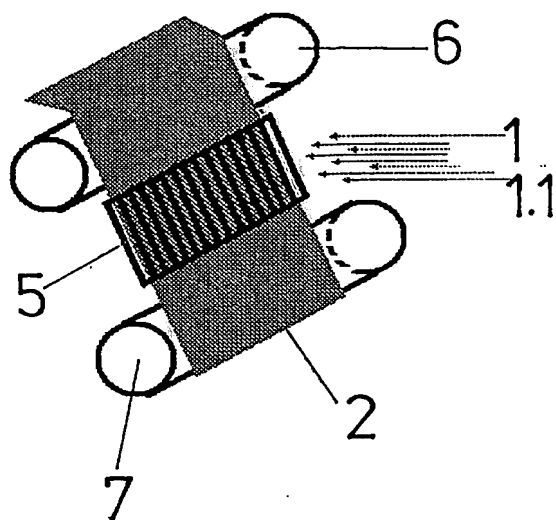


FIG. 2.1

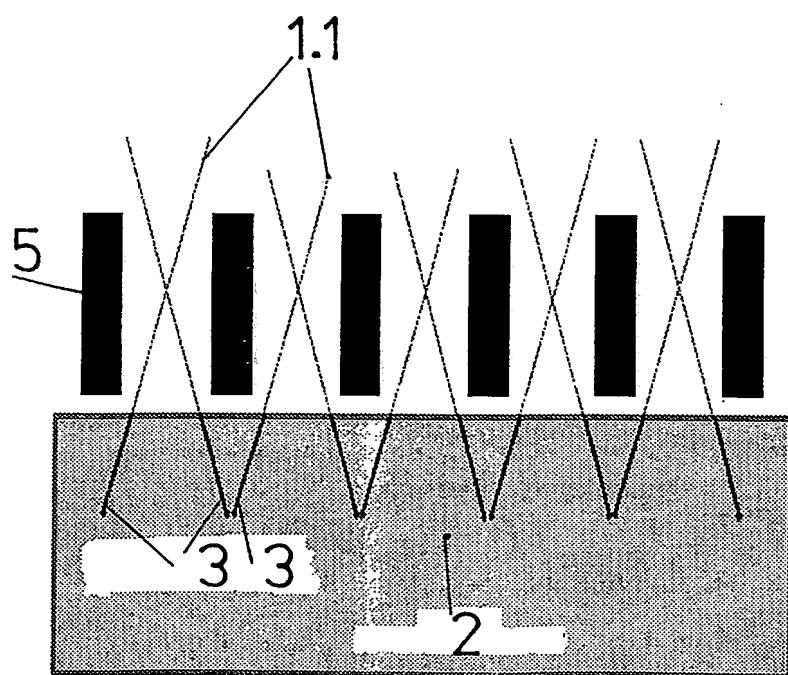


FIG. 2.2

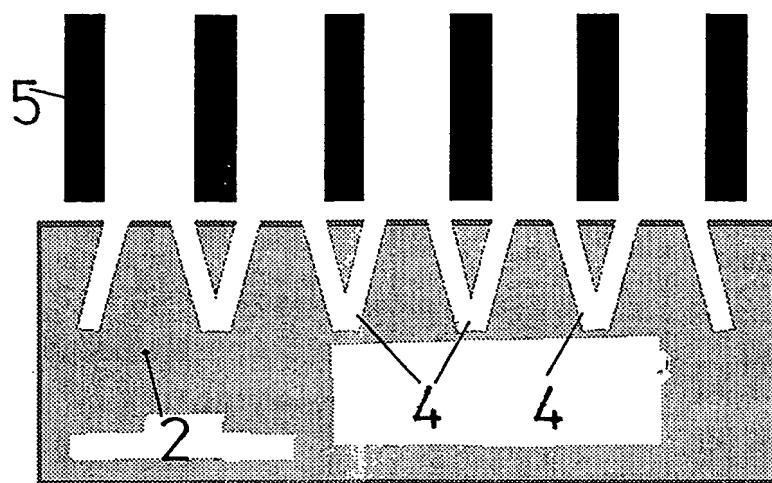
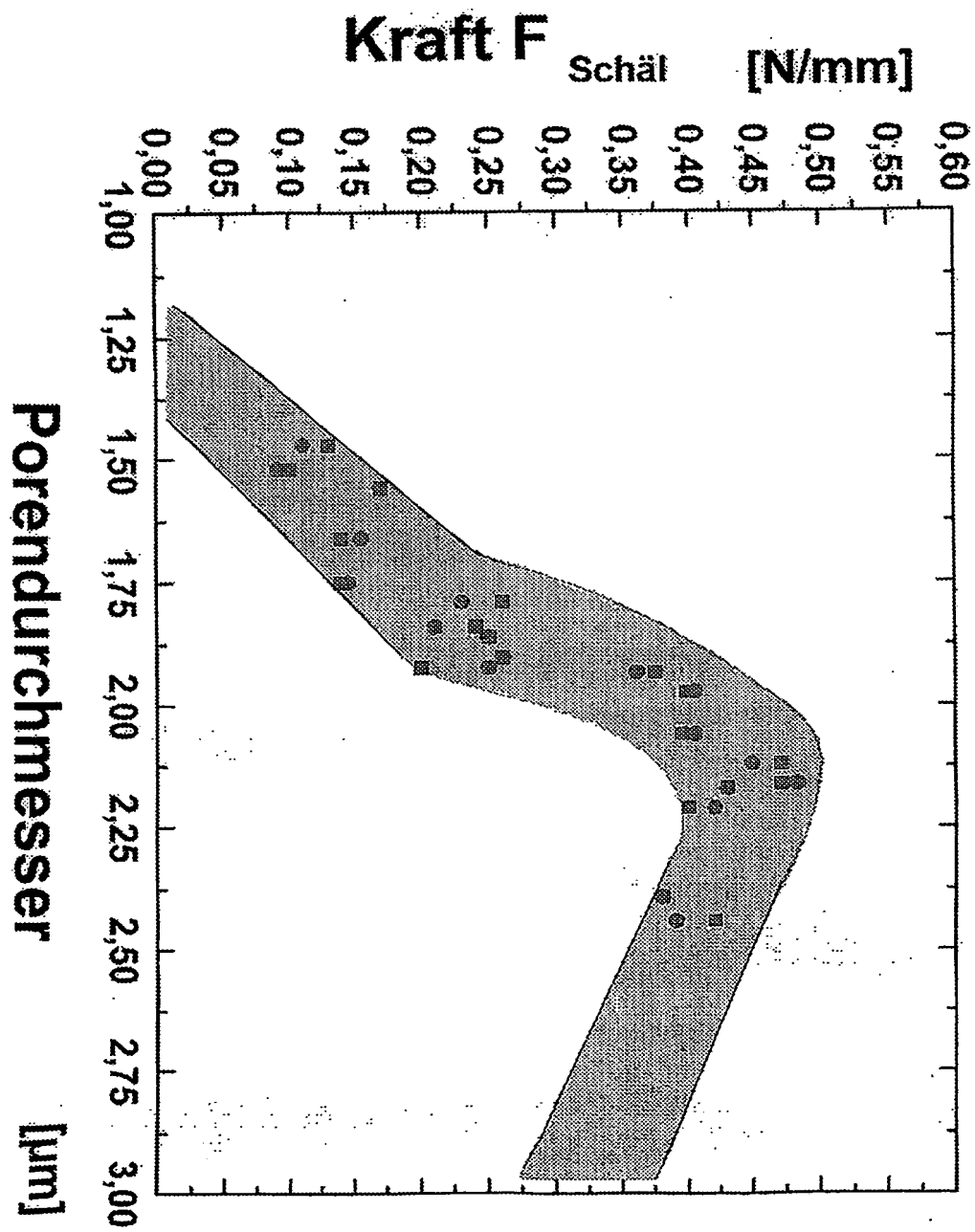


FIG. 2.3

FIG. 3



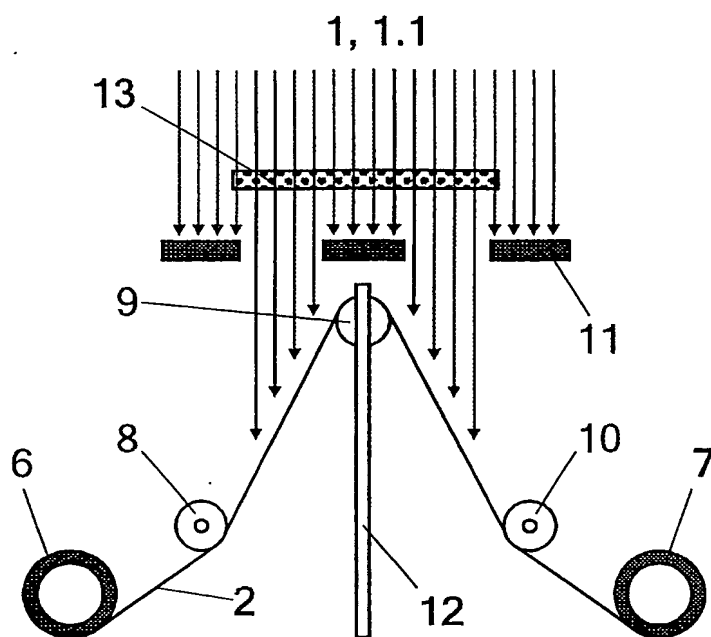


FIG. 4

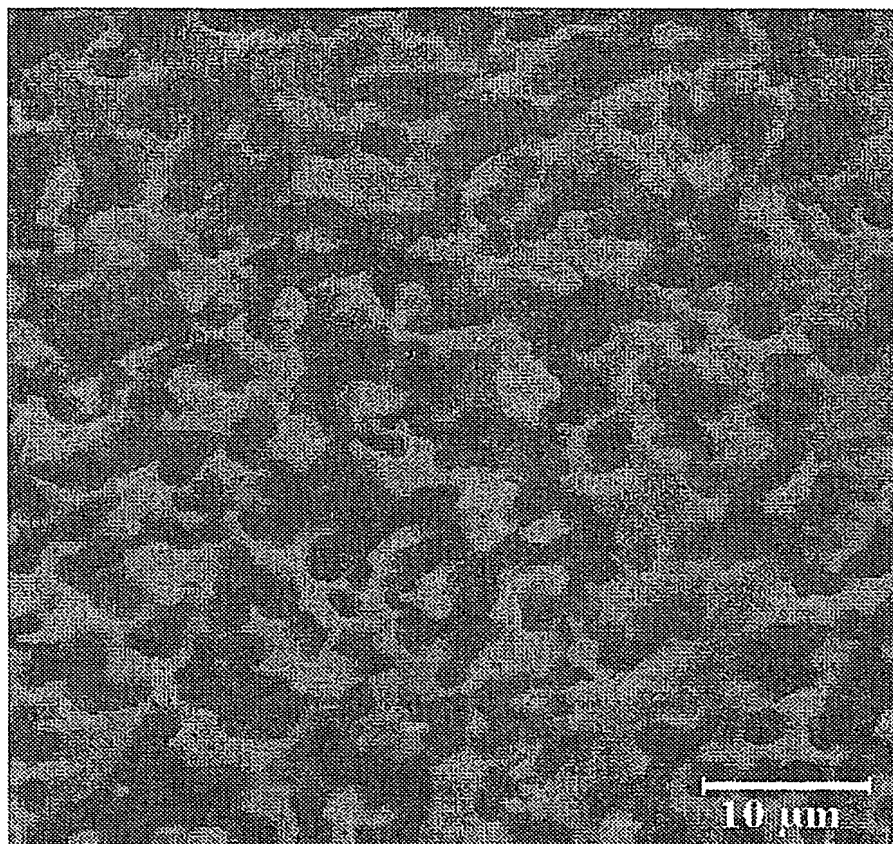


FIG. 5

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.